

天津市近郊地表风蚀型开放源对中心城区影响估算研究

陈莉^{1,2}, 姬亚芹^{1*}, 刘爱霞³, 白志鹏¹, 王斌⁴, 陈丽¹, 赵雪艳¹, 吴丽萍¹

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 2. 天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387; 3. 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 4. 天津市环境监测中心, 天津 300191)

摘要: 可吸入颗粒物(PM₁₀)是我国大部分城市环境空气的首要污染物, 地表风蚀尘是其重要来源, 需要对该源的贡献量进行定量估算. 基于TM遥感影像对天津土地利用类型进行分类并在近郊布设94个点采集地表土壤样品, 进行粒度分析, 基于GIS进行克里格插值计算, 得到土壤粒径分布. 结合风向、风速等气象数据, 计算得出2009年分季节近郊四区(北辰、西青、津南和东丽)土壤风蚀模数、风蚀量、释尘模数和释尘量. 结果表明, 天津市近郊春、夏、秋和冬的风蚀量分别为21 236.31、4 435.21、7 272.13和17 204.40 t; 北辰、西青、津南和东丽的全年风蚀量分别为6 380.23、32 881.13、8 340.67和2 546.02 t; 全年耕地和林草地的风蚀量分别为49 599.20和548.85 t. 天津市近郊2009年释尘量分别为9 352.92 t(粒径<10 μm)、20 587.99 t(粒径10~15 μm)和13 873.74 t(粒径15~20 μm). 天津市近郊输入中心城区20 μm以下的尘量为20 592.91 t, 10 μm以下的尘量为4 395.89 t, 占21.35%.

关键词: 风蚀模数; 释尘模数; 开放源; GIS; 天津市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2769-08

Estimation of the Effect Derived from Tianjin Suburban Wind Erosion Open Source on Central District

CHEN Li^{1,2}, JI Ya-qin¹, LIU Ai-xia³, BAI Zhi-peng¹, WANG Bin⁴, CHEN Li¹, ZHAO Xue-yan¹, WU Li-ping¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. College of Urban and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 3. Tianjin Institute of Meteorological Science; Tianjin 300074, China; 4. Tianjin Environmental Monitoring Centre, Tianjin 300191, China)

Abstract: In some Chinese cities air pollution is serious, and the major pollutant is still PM₁₀. The source apportionment results show: wind erosion dust is an important source of particulate matter. So the contribution of this source should be calculated. The suburban land of Tianjin was classified based on Landsat TM satellite image, and samples of different land use types were taken. The soil textures were determined with the analysis of soil samples by the laser particle analyzer and GIS-based interpolation computation. The wind erosion modulus, wind erosion fluxes, dust release modulus and dust release fluxes were calculated in four seasons in suburban of Tianjin (Beichen, Xiqing, Jinnan and Dongli). The wind erosion fluxes in spring, summer, autumn and winter were 21 236.31, 4 435.21, 7 272.13 and 17 204.4 t in 2009; the wind erosion fluxes in Beichen, Xiqing, Jinnan and Dongli were 6 380.23, 32 881.13, 8 340.67 and 2 546.02 t in 2009; the wind erosion fluxes from cultivated land and forest grassland were 49 599.2 and 548.85 t, respectively. The soil dust release fluxes in Tianjin suburban were 9 352.92 t (particle size < 10 μm), 20 587.99 t (particle size 10-15 μm) and 13 873.74 t (particle size 15-20 μm). In 2009, there were 20 592.91 t soil dusts with particulate diameter of 20 μm or less that were transmitted from suburban to central district, and 4 395.89 t with particulate diameter of 10 μm or less, about 21.35%.

Key words: wind erosion modulus; dust release modulus; open source; GIS; Tianjin

由裸土风蚀而注入大气的风蚀尘已经成为空气颗粒物的主要来源之一^[1~5], 在中国北方城市, 开放源的分担率已达40%~80%, 裸土风蚀尘是开放源类之一^[6,7]. 研究表明城市空气的PM₁₀浓度变化与上风向的沙尘关系密切^[8~10]. 宣捷^[11]使用美国环保局(USEPA)的2个公式计算了中国北方地面起尘速率(起尘因子)的分布, 计算结果表明, 在中国北方起尘因子自东向西逐渐增大, 其幅度达5个数量级; 春季是起尘最严重的季节, 起尘量占全年起尘

量的一半以上. 王帅杰等^[12]计算出石家庄市市区地面起尘量总计28 559 t/a, 农田和裸地的起尘量较大; 裸地面积占总面积的16%, 年起尘量为6 048 t/a, 占整个市区起尘量的21.2%, 而农田无作物时, 其单位面积起尘量甚至超过裸地, 全年平均值

收稿日期: 2010-10-11; 修订日期: 2010-11-26

基金项目: 环保公益性行业科研专项(200909005)

作者简介: 陈莉(1981~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气颗粒物污染与防治, E-mail: amychenli1981@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jiyaqin@nankai.edu.cn

也只是稍逊于裸地,且农田面积十分广大,占总面积的 53.9%,年起尘量为18 896 t/a. 张华等^[13]以春季风蚀活动高发期为特定研究时段,采用地面埋设容器的“陷阱诱捕”法,对秋收后翻耕的裸露沙质农田春播前的土壤风蚀量动态进行了定位观测;主要研究结果是:观测期内,平均土壤日风蚀量为 241.20 kg/hm². 土壤风蚀过程以细微土粒的跃移和悬移运动为主,损失掉的主要是表层土壤中的细砂(粒径 0.1~0.05 mm)、粉粒(粒径 0.05~0.002 mm)和黏粒(粒径 <0.002 mm)等富含营养元素的细微颗粒,分别占风蚀沉积物的 46.01%、21.03% 和 21.74%.

天津处于半湿润半干旱地区,春季(干)旱(多)风同期形成了地表风蚀的气象条件,又恰逢天津郊区(春季)量大面广的季节性裸露农田、河滩地和裸露盐碱地形成了风蚀的地表条件,这是造成天津地表风蚀严重的主要因素. 天津市 2002 年大气颗粒物来源解析(CMB 法)结果表明,土壤风蚀尘的分担率全年平均达到 27%,居各排放源类之首^[14]. 可见地表风蚀起尘是造成城市空气颗粒物污染超标的主要因素之一. 天津颗粒物水平相对较高的状况与由暴露地表造成的整体环境背景颗粒物水平较高有直接关系^[15~17]. 因此,要进一步降低颗粒物质量浓度,必须有效降低作为背景颗粒物重要来源的地表风蚀型开放源. 鉴于以前的研究均以受体模型为基础,本研

究尝试以大气扩散理论为依据,定量估算天津近郊不同土地利用类型、不同土壤质地的表层土壤在当地气象条件下形成的地表风蚀尘对城市空气颗粒物的影响,以期为确定大气颗粒物污染源重要性和采取优控措施提供理论依据.

城市空气颗粒物开放源已成为大气颗粒物的主要来源之一,在城市空气污染源中占重要地位,但目前所做的关于大气颗粒物排放源的研究主要着重于重要的工业排放源,关于开放源的研究工作还很少. 地表风蚀型开放源是大气颗粒物的重要来源,目前只有少数的开放源类起尘量可以进行估算,对城市空气颗粒物开放源的理论和方法研究在国内少有报道. 为此,本研究以天津市近郊为例,定量估算地表风蚀起尘对中心城区的颗粒物来源贡献,以期为指导开放源的管理工作提供依据.

1 数据与方法

1.1 数据处理

(1) 风速数据统计

为了估算天津市近郊各个区耕地和林草地在 2009 年四季内的土壤风蚀量,分别对天津市近郊各区(北辰、西青、津南和东丽)气象数据进行统计,计算出各区 2009 年不同等级风速发生的累积时数,见表 1.

表 1 各气象站点 2009 年各等级风速发生的累积时数/h
Table 1 Accumulative time of wind with different scale from weather stations in 2009/h

风速/m·s ⁻¹	气象站点															
	北辰				西青				津南				东丽			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
0~1	390	744	794	781	187	310	517	488	103	247	258	265	407	580	704	733
1~2	676	821	734	617	551	843	792	719	483	733	812	721	649	821	741	630
2~3	553	433	387	417	554	545	439	386	559	639	526	463	512	490	379	351
3~4	343	162	185	209	357	286	190	233	405	358	241	276	333	223	190	185
4~5	136	36	59	72	256	137	113	152	310	152	160	142	159	62	98	123
5~6	67	8	19	36	141	54	74	76	168	54	87	92	63	20	43	64
6~7	30	2	3	18	78	19	30	38	90	16	40	78	34	5	19	36
7~8	12	1	2	6	36	7	10	31	37	6	35	47	20	2	7	27
8~9	1	1	1	3	26	5	3	13	27	0	8	35	12	1	0	5
9~10	0	0	0	1	10	1	4	11	16	3	14	11	7	0	2	2
10~11	0	0	0	0	8	0	2	5	5	0	2	10	0	0	0	3
11~12	0	0	0	0	4	0	0	5	3	0	0	7	0	0	0	1
12~13	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	1	7	0	0	0	0
13~14	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
14~15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0

(2) 土地利用类型分类

采用 2008 年 7 月天津 TM 遥感影像(分辨率 15

m)对天津近郊土地利用类型进行分类,分别包括耕地(水田、旱地)、林地(有林地、灌木林、疏林地、其

它林地)、草地(高覆盖度、中覆盖度、低覆盖度)、水域(河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、河漫滩)、城乡、工矿、居民用地(城镇用地、农村居民点、其它建设用

地)、未利用土地(盐碱地、沼泽地、裸土地),见图 1. 在进行风蚀模数和风蚀量计算的时候,把未利用地分别归入覆盖度为 0 的林草地.

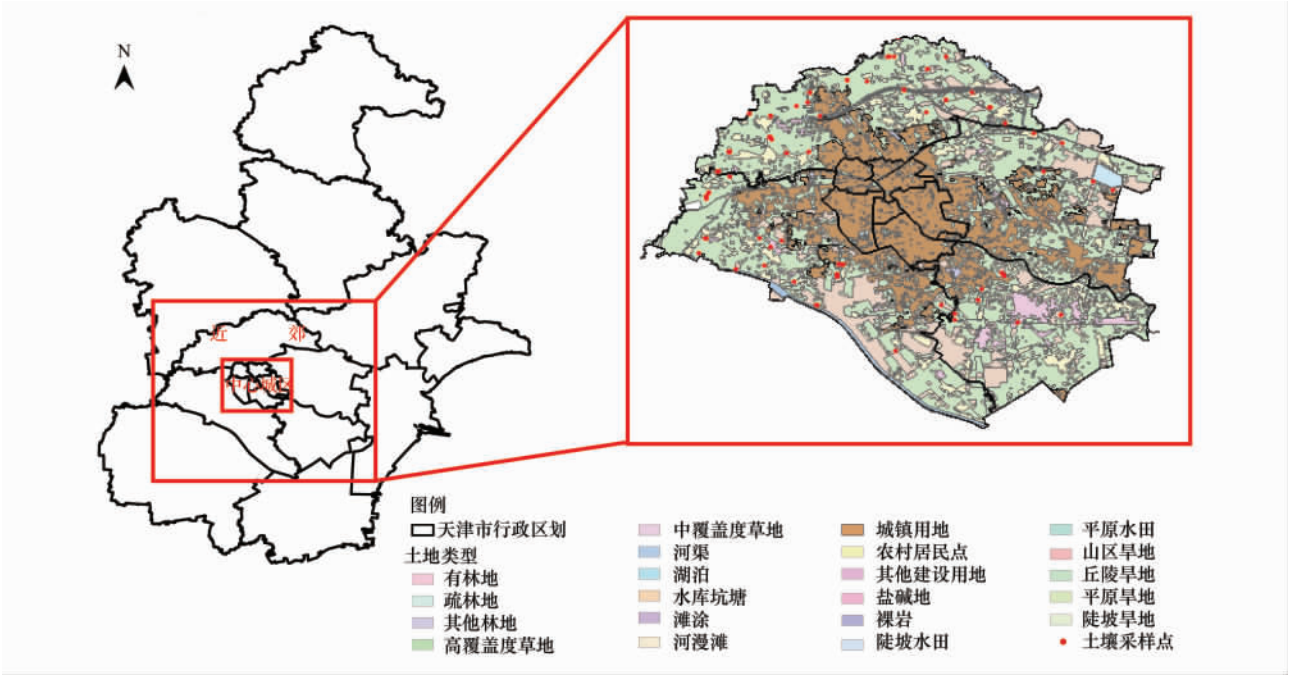


图 1 天津近郊土地利用类型分类

Fig.1 Land use types in Tianjin suburban

(3) 土壤样品采集、处理和粒度组成分析

根据耕作土壤剖面特征和天津市主要土地利用类型,确定土壤样品采集深度为 0 ~ 15 cm 和地块,共采集土壤样品 94 个. 土壤样品于实验室自然阴干,过 60 目尼龙筛. 粒度分析采用 BT-9300S 激光粒度分布仪测定^[18].

以 Arcgis 为平台,对 94 个土壤样品中位粒径进行克里格插值,并进行重分类计算,得到各区表层土壤粒度组成(见图 2,表 2).

1.2 不同地表土壤风蚀模数估算方法

(1) 耕作土壤风蚀模数估算方法^[19~29]

$$Q_{fa} = 10 \cdot \overset{A}{C} \cdot \sum_{j=1} \left[T_j \cdot \exp \left\{ -9.208 + \frac{0.018}{Z_0} + 1.955 \cdot \left[(A \cdot U_j)^{0.5} \right] \right\} \right] \quad (1)$$

式中, Q_{fa} 为土壤风蚀模数 $t/(hm^2 \cdot a)$; $\overset{A}{C}$ 为尺度修订系数,约为 0.001 8; A 为风速修订系数; U_j 为气象站整点风速统计中高于临界侵蚀风速的第 j 级风速; Z_0 为地表空气动力学粗糙度 (cm),对于我国北方传统耕作方式,翻耕后裸露耕地表面的空气动力学粗糙度约为 0.55 cm; T_j 为风蚀活动发生月份内

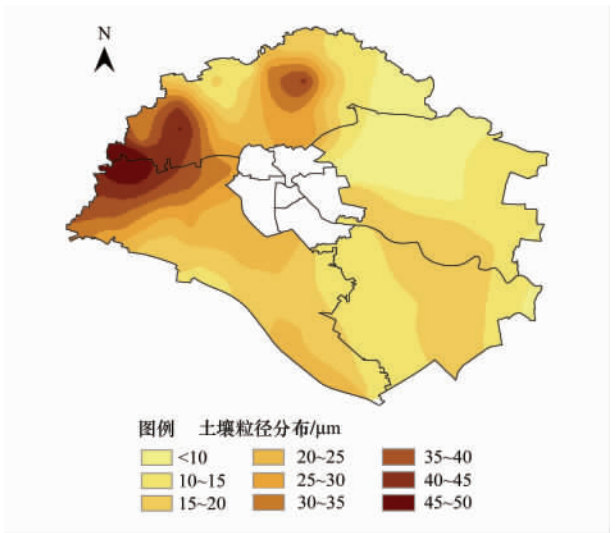


图 2 土壤粒径插值分布

Fig.2 Interpolation of soil particle size distribution

风速为 U_j 的累积时间 (min). 我国北方旱作农田临界侵蚀风速一般略大于流沙地表的 5 m/s,气象站整点风速统计中高于临界侵蚀风速的第一个风速等级为 5 ~ 6 m/s,取平均值 5.5 m/s,因此 $U_{j=1} = 5.5$ m/s. $U_{j=2} = 6.5$ m/s,依次类推. U_j 最高为整点风速记录中的最大风速.

表 2 天津市近郊表层土壤粒度组成/%
Table 2 Size composition of surface soil in Tianjin suburban/%

地区	<10 μm	10 ~ 15 μm	15 ~ 20 μm	20 ~ 25 μm	25 ~ 30 μm	30 ~ 35 μm	35 ~ 40 μm	40 ~ 45 μm	45 ~ 50 μm
北辰	13.84	26.23	17.13	15.36	10.34	7.51	6.94	1.79	0.87
西青	0.01	30.85	38.09	8.54	8.52	6.23	3.53	2.66	1.58
津南	4.33	93.17	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
东丽	49.46	46.75	3.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(2) 草地和林地土壤风蚀模数估算方法^[19-29]

$$Q_{\text{fgf}} = 10 \cdot C^A \sum_{j=1} \{ T_j \cdot \exp[2.4869 - 0.0014VC^2 - 54.9472/(AU_j)] \}$$
 (2)

式中, Q_{fgf} 为植被盖度为 VC 时草地或林地土壤风蚀模数 $[t/(hm^2 \cdot a)]$; U_j 为气象站风速统计中高于临界侵蚀风速的第 j 级风速(m/s); T_j 为该级风速的累积时间(min); C 为尺度修订系数, 约为 0.0018; A 为风速修订系数.

本研究中春季(3、4、5 月)和秋季(9、10、11 月)植被平均盖度取 30%, 夏季(6、7、8 月)取 80%, 冬季(12、1、2 月)取 10%.

2 结果与分析

2.1 土壤风蚀估算结果及其特征

利用上述方法, 计算了 2009 年天津市近郊四季土壤风蚀模数及风蚀量, 见表 3.

西青与津南两区的风蚀模数明显高于北辰和东

表 3 天津市近郊土壤风蚀模数和风蚀量估算表
Table 3 Estimation of wind erosion modulus and wind erosion fluxes in Tianjin districts

地区	类型	面积/hm ²	风蚀模数/t · hm ⁻²				风蚀量/t			
			春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
北辰	耕地	1 574.00	2.05	0.24	0.45	1.31	3 226.70	377.76	708.30	2 061.94
	林草地	17.30	0.04	0.04	0.04	0.20	0.69	0.69	0.69	3.46
西青	耕地	1 772.00	7.99	1.94	2.62	5.89	14 158.28	3 437.68	4 642.64	10 437.08
	林草地	24.20	3.49	0.62	0.66	3.72	84.46	15.00	15.97	90.02
津南	耕地	298.80	9.05	1.51	4.90	11.56	2 704.14	451.19	1 464.12	3 454.13
	林草地	17.70	3.95	0.22	1.86	9.06	69.92	3.89	32.92	160.36
东丽	耕地	289.50	3.31	0.51	1.39	3.34	958.25	147.65	402.41	966.93
	林草地	33.87	1.00	0.04	0.15	0.90	33.87	1.35	5.08	30.48

丽, 这与各区的气象条件有关, 西青与津南区内较大风速的累积时数高于北辰和东丽(例如, 风速在 6 ~ 7 m/s, 西青与津南累积时数分别达 78 h 和 90 h, 而北辰和东丽分别达 30 h 和 34 h, 基本达到了 2 ~ 3 倍).

计算得出, 北辰、西青、津南和东丽耕地的全年风蚀量分别为 6 374.70、32 675.68、8 073.58 和 2 475.24 t; 林草地的全年风蚀量分别为 5.53、205.45、267.09 和 70.78 t. 由此可见, 西青和津南 2 个区的风蚀量较大, 而北辰和东丽两个区的风蚀量较小. 从四季来看, 春季的风蚀模数和风蚀量明显高于其它季节, 这与春季气象条件有关. 从地表类型来看, 耕地的风蚀模数和风蚀量明显高于林草地, 北辰耕地春、夏、秋和冬的风蚀模数分别是林草地的 51.25、6、11.25 和 6.55 倍, 西青分别为 2.29、3.13、3.97 和 1.58 倍, 津南分别为 2.29、6.86、2.63 和 1.28 倍, 东丽分别为 3.31、12.75、9.27 和

3.71 倍, 这说明植被覆盖对于风蚀有明显的抑制作用.

2.2 地表对大气释尘量

地表对大气释放沙尘是土壤风蚀引起的. 在中等对流强度条件下, 较粗的颗粒被风力搬运的距离较近, 细小颗粒能够被风力搬运较远的距离, 颗粒越小被搬运的距离越远, 微小颗粒可被搬运数十至数千 km^[19]. 这里的“地表对大气的释尘量”仅是指源自天津市近郊范围内的地表对大气释放的尘量. 地表释尘模数是指单位面积在某季节内对大气释放的尘量.

耕地释尘模数^[19]:

$$Q_{\text{fd}} = a \cdot Q_{\text{fa}}$$

式中, Q_{fd} 为耕地释尘模数, Q_{fa} 为耕地风蚀模数, a 为尘粒在表层土壤中的百分比.

林草地释尘模数^[19]:

$$Q_{\text{fgd}} = 0.45 \cdot b \cdot Q_{\text{fgf}}$$

式中, Q_{fgd} 为林草地释尘模数, Q_{fgf} 为林草地风蚀模数, b 为尘粒在表层土壤中的百分比.

各区地表对大气的释尘模数和释尘量计算结果见表 4.

表 4 天津市近郊土壤释尘模数和释尘量估算表

Table 4 Estimation of dust release modulus and dust release fluxes in Tianjin districts

季节	地区	类型	释尘模数/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$			释尘量/t		
			< 10 μm	10 ~ 15 μm	15 ~ 20 μm	< 10 μm	10 ~ 15 μm	15 ~ 20 μm
春	北辰	耕地	0.283 7	0.537 7	0.351 2	446.575 3	846.339 8	552.788 8
		林草地	0.002 5	0.004 7	0.003 1	0.043 1	0.081 3	0.053 6
	西青	耕地	0.000 8	2.464 9	3.043 4	1.415 8	4 367.802 8	5 392.904 8
		林草地	0.000 2	0.484 5	0.598 2	0.003 8	11.724 9	14.476 4
	津南	耕地	0.391 9	8.431 9	0.226 3	117.089 3	2 519.451 7	67.618 4
		林草地	0.077 0	1.656 1	0.044 4	1.362 3	29.313 0	0.785 9
	东丽	耕地	1.637 1	1.547 4	0.125 4	473.948 0	447.972 3	36.303 3
		林草地	0.222 6	0.210 4	0.017 1	7.538 4	7.126 2	0.579 2
夏	北辰	耕地	0.033 2	0.063 0	0.041 1	52.256 8	99.162 0	64.691 4
		林草地	0.002 5	0.004 7	0.003 1	0.043 3	0.081 3	0.053 6
	西青	耕地	0.000 2	0.598 5	0.738 9	0.354 4	1 060.542 0	1 309.330 8
		林草地	0.000 03	0.086 1	0.106 3	0.000 7	2.083 6	2.572 5
	津南	耕地	0.065 4	1.406 9	0.037 8	19.541 5	420.381 7	11.294 6
		林草地	0.004 3	0.092 2	0.002 5	0.076 1	1.631 9	0.044 3
	东丽	耕地	0.252 2	0.238 4	0.019 3	73.011 9	69.016 8	5.587 4
		林草地	0.008 9	0.008 4	0.000 7	0.301 4	0.284 5	0.023 7
秋	北辰	耕地	0.062 3	0.118 0	0.077 1	98.060 2	185.732 0	121.355 4
		林草地	0.002 5	0.004 7	0.003 1	0.043 3	0.081 3	0.053 6
	西青	耕地	0.000 3	0.808 3	0.998 0	0.531 6	1 432.307 6	1 768.456 0
		林草地	0.000 03	0.091 6	0.113 1	0.000 7	2.216 7	2.737 0
	津南	耕地	0.212 2	4.565 3	0.122 5	63.405 4	1 364.111 6	36.603 0
		林草地	0.036 2	0.779 8	0.020 9	0.640 7	13.802 5	0.369 9
	东丽	耕地	0.687 5	0.649 8	0.052 7	199.031 3	188.117 1	15.256 7
		林草地	0.033 4	0.031 6	0.002 6	1.131 3	1.070 3	0.088 1
冬	北辰	耕地	0.181 3	0.343 6	0.224 4	285.366 2	540.826 4	353.205 6
		林草地	0.012 5	0.023 6	0.015 4	540.826 4	0.408 3	0.266 4
	西青	耕地	0.000 6	1.817 1	2.243 5	0.408 3	3 219.901 2	3 975.482 0
		林草地	0.000 2	0.516 4	0.637 6	3 219.901 2	12.496 9	15.429 9
	津南	耕地	0.500 5	10.770 5	0.289 0	12.496 9	3 218.225 4	86.353 2
		林草地	0.176 5	3.798 5	0.101 9	3218.225 4	67.233 5	1.803 6
	东丽	耕地	1.652 0	1.561 5	0.126 6	67.233 5	452.054 3	36.650 7
		林草地	0.200 3	0.189 3	0.015 3	452.054 3	6.411 6	0.518 2

各气象站点某一风速等级的累积时数差异较大.例如,春季 5 ~ 6 m/s 风速北辰和东丽累积时数为 60 多 h(北辰:67 h,东丽:63 h),而西青和津南为 100 多 h(西青:141 h,津南:168 h).同时,西青的耕地面积为 1 772 hm²,在近郊的 4 个区中最大,气象条件和地表类型决定了该区域风蚀量与释尘量高于其他区域.

2.3 进入天津中心城区的尘量计算

(1) 根据所选择的气象站风速、风向统计数据,选取近郊各区指向天津中心城区风向的风速.风速从 5 m/s 开始,按 1 m/s 间隔统计,风向按 16 方位统计,结果见表 5.

每个方向包括的区域,N:北辰;NNE:北辰、东

丽;NE:北辰、东丽;ENE:北辰、东丽;E:东丽;ESE:东丽、津南;SE:津南、西青;SSE:津南、西青;S:西青;SSW:西青;SW:西青;WSW:西青;W:西青、北辰;WNW:西青、北辰;NW:北辰;NNW:北辰.

(2) 以天津市中心城区为中心向外画出 16 风向方位线,再以每条风向方位线为中心,两侧各 ±11.25° 的扇形范围内,计算同心圆与每条风向方位线两侧 ±11.25° 线之间的扇环面积,见图 3.

(3) 由于 25 μm 尘粒进入大气,在 8 m/s 风速下运移距离为 55.5 km,20 μm 尘粒进入大气,在 5 m/s 风速下运移距离为 84.7 km^[19],已超过近郊范围,地表起尘后只要风向指向中心城区,尘粒就能够到达.所以,地表起尘粒径在 20 μm 以下时,只需考

表 5 指向天津中心城区的风速风向统计结果
Table 5 Statistical results of wind speed and direction to Tianjin central district in 2009

风向	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	累积时数/h				风向	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	累积时数/h			
		春	夏	秋	冬			春	夏	秋	冬
N	5~6	9	0	2	11	SSE	5~6	7/8	2/8	1/0	3/1
	6~7	6	1	1	6		6~7	2/0	0/1	0/0	0/2
	7~8	5	0	0	4		7~8	0/0	1/0	0/0	0/0
	8~9	1	0	0	1	S	5~6	8	1	0	1
NNE	5~6	1/0	1/0	0/0	5/0		6~7	1	0	0	0
	6~7	1/0	0/0	0/0	2/1		7~8	0	1	0	0
	7~8	0/0	0/0	0/0	1/0		5~6	18	8	1	0
	8~9	0/0	0/0	0/0	0/0	SSW	6~7	10	0	0	0
NE	9~10	0/0	0/0	0/0	1/0		7~8	1	0	0	0
	5~6	0/1	0/1	0/0	0/0		5~6	11	3	0	0
	6~7	1/0	0/0	0/0	0/0		6~7	7	1	0	0
	7~8	1/0	1/0	0/0	0/0	WSW	5~6	11	1	1	1
ENE	5~6	3/1	1/0	2/0	2/1		6~7	6	1	0	0
	6~7	1/0	0/1	0/0	0/0		7~8	2	0	0	0
	5~6	4	3	3	0	W	5~6	4/6	1/0	0/0	0/0
	6~7	2	0	2	0		6~7	0/1	0/0	0/0	0/0
E	7~8	3	0	1	0		7~8	0/2	0/0	0/0	0/0
	8~9	1	0	0	0		5~6	11/7	4/0	1/4	3/3
ESE	5~6	1/25	2/4	6/3	3/8	WNW	6~7	0/0	1/0	0/0	0/0
	6~7	3/7	0/5	2/0	2/0		7~8	2/0	0/0	0/0	0/0
	7~8	4/5	0/0	0/1	1/0	NW	5~6	4	1	6	8
	8~9	1/3	0/0	0/0	0/0		6~7	2	0	0	4
SE	9~10	1/0	0/0	0/0	0/0		7~8	0	0	1	1
	5~6	25/18	13/7	3/4	4/3		8~9	0	0	1	1

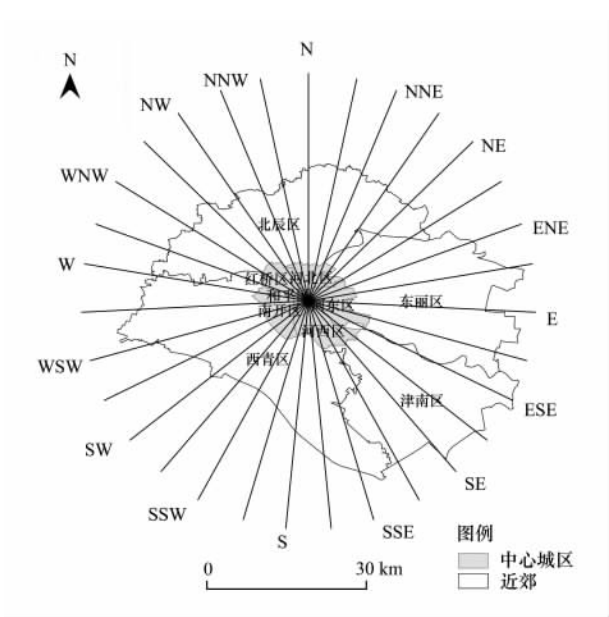


图 3 尘粒在不同风向下的分布范围

Fig. 3 Dust distribution range with different wind direction

虑风向,起尘面积是近郊外缘以内的扇形面积.
进入天津中心城区尘量计算方法^[19]:

$$Q = \sum_{j=1}^{j=15} \left\{ 0.45 \cdot \sum_{i=1}^{i=3} \left[\lambda_i \cdot \sum_{h=1}^{h=4} \left(s_{hjk} \cdot Q_{jk} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

式中, λ_i ($i=1, 2, 3$) 分别为各区表层土壤尘粒粒径 $<10 \mu\text{m}$ 、 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 和 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 的质量; s_{hjk} 分别为风速 U_j ($j=5, 6, 7, \dots, 10$) 时所对应的第 k 个方位的扇形面积; Q_{jk} 为风速 U_j 时所对应的第 h 个区的风蚀模数. 由于粒径 $<20 \mu\text{m}$ 尘粒一旦进入大气, 能够被长距离搬运, 在计算时, 各风向下对应的起尘面积就是对应的扇形面积.

2009 年四季可能到达天津中心城区的尘量见表 6, 天津市近郊输入中心城区 $20 \mu\text{m}$ 以下的尘量为 $20\,592.91 \text{ t}$, $10 \mu\text{m}$ 以下的尘量为 $4\,395.89 \text{ t}$, 占 21.35% , 而这部分输尘量正是中心城区 PM_{10} 的重要来源.

2009 年中心城区烟尘排放量为 $12\,639.6 \text{ t}^{[30]}$, 而从近郊输入的风蚀起尘量 $20 \mu\text{m}$ 以下的尘量为 $20\,592.91 \text{ t}$, $10 \mu\text{m}$ 以下的尘量为 $4\,395.89 \text{ t}$, 可见大气颗粒物来自风蚀起尘的开放源部分已经超过城区烟尘排放量, 所以为了进一步降低大气颗粒物浓

表 6 2009 年四季可能到达天津中心城区的尘量/t
Table 6 Attainable dust to Tianjin central district in 2009/t

地区	春季				夏季			
	<20 μm	15 ~ 20 μm	10 ~ 15 μm	<10 μm	<20 μm	15 ~ 20 μm	10 ~ 15 μm	<10 μm
北辰	867.57	259.84	397.82	209.91	101.65	30.43	46.64	24.58
西青	4 600.52	2 541.47	2 058.38	0.67	1 116.19	616.59	499.43	0.17
津南	1 285.74	32.15	1 197.92	55.67	212.90	5.33	198.35	9.22
东丽	457.53	17.33	213.90	226.30	69.67	2.64	32.57	34.46

地区	秋季				冬季			
	<20 μm	15 ~ 20 μm	10 ~ 15 μm	<10 μm	<20 μm	15 ~ 20 μm	10 ~ 15 μm	<10 μm
北辰	190.50	57.06	87.33	46.11	808.82	166.13	254.38	388.31
西青	1 506.94	832.46	674.23	0.25	4 908.51	1875.73	1 519.23	1 513.55
津南	695.10	17.38	647.62	30.10	3 104.04	41.43	1 544.17	1 518.44
东丽	190.21	7.21	88.92	94.08	477.02	17.47	215.48	244.07

度,开放源的控制不容忽视.

3 结论

(1)北辰、西青、津南和东丽的全年风蚀量分别为6 380.23、32 881.13、8 340.67和2 546.02 t.受气象条件和地表类型的影响,西青和津南这2个区的风蚀量较大,而北辰和东丽这2个区的风蚀量较小.

(2)天津市近郊春、夏、秋和冬四季的风蚀量分别为21 236.31、4 435.21、7 272.13和17 204.40 t,春季的风蚀模数和风蚀量明显高于其它季节.

(3)2009 年天津市近郊耕地和林草地的风蚀量分别为49 599.2和548.85 t.耕地的风蚀模数和风蚀量明显高于林草地.

(4)天津市近郊 2009 年释尘量分别为9 352.92 t(粒径<10 μm)、20 587.99 t(粒径10~15(m)和13 873.74 t(粒径15~20 μm).天津市近郊输入中心城区 20 μm 以下的尘量为20 592.91 t,10 μm 以下的尘量为4 395.89 t,占21.35%,而这部分输尘量正是中心城区 PM₁₀的重要来源.

(5)土壤风蚀型开放源对城市空气颗粒物的贡献已超过城市烟尘的排放量,宜加大控制力度.

(6)由于经验公式的参数来源于文献,为了更准确地估算土壤风蚀量和释尘量,应该在研究区进行风洞实验,得到本地化的参数.

(7)作为地表风蚀开放源的耕地可进一步划分为水田、旱地等;而林草地也可进一步划分为有林地、疏林地、不同覆盖度的草地等.风蚀颗粒物源更细致地分析需要进行研究区内的实验,以得到不同风蚀颗粒物源的公式参数,这也是以后工作的重点.

参考文献:

[1] Waggoner P, Weiss R E, Ahlquist N C, *et al.* Optical characteristics of atmospheric aerosols [J]. Atmospheric Environment, 1981, **15**(10-11): 1891-1909.

[2] Waldman, Liroy P J, Zelenka M, *et al.* Wintertime measurements of aerosol acidity and trace elements in Wuhan, a city in central China[J]. Atmospheric Environment, 1991, **25**(1): 113-120.

[3] 朱坦,白志鹏. 化学质量平衡受体模型新技术的应用: TEDA 大气颗粒物来源解析实例[J]. 城市环境与城市生态,1996,**9**(1): 9-14.

[4] Tegen I, Fung I. Modeling mineral dust in the atmosphere: sources, transport, and optical thickness [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, **99** (D11): 22897-22914.

[5] Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, **101** (D14): 19237-19244.

[6] 戴树桂. 环境化学进展[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 18-56.

[7] 余晔,夏敦胜,陈雷华,等. 兰州市 PM₁₀ 污染变化特征及其成因分析[J]. 环境科学,2010,**31**(1):22-28.

[8] 秦保平,解辉,韩静. 天津市空气污染物 PM₁₀/TSP 比例研究 [J]. 城市环境与城市生态,2002,**15**(6):20-21.

[9] 黄鹂鸣,王格慧,王荟,等. 南京市空气中颗粒物 PM₁₀,PM_{2.5} 污染水平[J]. 中国环境科学,2002,**22**(4):334-337.

[10] 任晰,胡非,胡欢陵. 2002 年沙尘现象对北京大气中 PM₁₀ 质量浓度的影响评估[J]. 环境科学研究,2004,**17**(1):51-55.

[11] 宣捷. 中国北方地面起尘总量分布[J]. 环境科学学报, 2000,**20**(4):426-428.

[12] 王帅杰,朱坦,洪刚. 石家庄市地面起尘量估算方法[J],城市环境与城市生态,2003,**16**(6):248-250.

[13] 张华,李锋瑞,张铜会,等. 春季裸露沙质农田土壤风蚀量动态与变异特征[J]. 水土保持学报, 2002,**16**(1):29-32.

[14] 韩咏,白志鹏,姬亚芹,等. 裸土风蚀型开放源起尘机制研究进展[J]. 环境污染与防治,2008,**30**(2):77-82.

[15] 王帅杰,朱坦. 城市空气颗粒物开放源理论与治理技术研究进展[J]. 城市环境与城市生态,2003,**16**(6):193-194.

[16] 张利文,白志鹏,郭光焕,等. 开放源对环境空气质量影响的评估技术与实例[J]. 环境科学研究,2006,**19**(3):18-23.

[17] 王存忠,牛生杰,周悦. 中国风蚀起沙研究进展[J]. 气象, 2009,**35**(11):107-116.

[18] 邢茂,郭烈锦. 土壤风蚀中粉尘释放规律研究[J]. 中国科学

G 辑: 物理学 力学 天文学,2008,**38**(8):984-998.

[19] 高尚玉,张春来,邹学勇,等. 京津风沙源治理工程效益[M]. 北京:科学出版社,2008.

[20] 韩庆杰,屈建军,张克存,等. 华南热带湿润海滩风蚀模数的风洞研究[J]. 水土保持学报,2010,**24**(1):37-40.

[21] 王学芳,孙万仓,李孝泽,等. 我国北方风蚀区冬油菜抗风蚀效果[J]. 生态学报,2009,**29**(12):6572-6577.

[22] 王学芳,孙万仓,李芳,等. 中国西部冬油菜种植的生态效应评价[J]. 应用生态学报,2009,**20**(3):647-652.

[23] Villaseñor R, Lopez-Villegas M T, Eidels-Dubovoi S, *et al.* A mesoscale modeling study of wind blown dust on the Mexico City Basin[J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(18): 2451-2462.

[24] Funk R, Skidmore E L, Hagen L J. Comparison of wind erosion measurements in Germany with simulated soil losses by WEPS [J]. Environmental Modelling & Software, 2004, **19**(2): 177-183.

[25] Hoffmann C, Funk R, Wieland R, *et al.* Effects of grazing and topography on dust flux and deposition in the Xilingele grassland, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Environments, 2008, **72**(5): 792-807.

[26] Korcz M, Fudala J, Klis C. Estimation of wind blown dust emissions in Europe and its vicinity [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(7):1410-1420.

[27] Hoffmann C, Funk R, Sommer M. Temporal variations in PM₁₀ and particle size distribution during Asian dust storms in Inner Mongolia[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(36): 8422-8431.

[28] Offer Z Y, Goossens D. Thirteen years of aeolian dust dynamics in a desert region (Negev desert, Israel): analysis of horizontal and vertical dust flux, vertical dust distribution and dust grain size[J]. Journal of Arid Environments, 2004, **57**(1): 117-140.

[29] Visser S M, Sterk G, Karssenberg D. Wind erosion modelling in a Sahelian environment [J]. Environmental Modelling & Software, 2005, **20**(1): 69-84.

[30] 天津市环境保护局. 天津市环境质量报告书(2009 年)[R]. 天津:天津市环境保护局, 2010.